**ISSN 2710 – 1673 Artificial Intelligence 2024 № 4**

**УДК: 004.8** https://doi.org/10.15407/jai2024.04.142

**Є. В. Івохін[1], К. Е. Юштін[2]**
[1,2]Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Україна
пр. Глушкова, 4д, м. Київ, 83000
[1]ivohin@knu.ua
[2]gkons@univ.kiev.ua
[1]https://orcid.org/0000-0002-5826-7408
[2]https://orcid.org/0009-0001-9881-2343

# МЕТОД РОЗВ'ЯЗАННЯ ОДНІЄЇ НЕЧІТКОЇ БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНОЇ ЗАДАЧІ КОМІВОЯЖЕРА

**Ye. Ivohin[1], K. Yushtin[2]**
[1,2]Taras Shevchenko National University of Kyiv, Ukraine
4d, Glushkova st., Kyiv, 83000
[1]ivohin@knu.ua
[2]gkons@univ.kiev.ua
[1]https://orcid.org/0000-0002-5826-7408
[2]https://orcid.org/0009-0001-9881-2343

# ON THE METHOD OF SOLVING THE FUZZY MULTICRITERIA TRAVELING SALESMAN PROBLEM

**Анотація.** У роботі досліджується нечітка багатокритеріальна задача комівояжера з критеріями у вигляді відстані та тривалості проїзду за маршрутом. Формалізовано постановку задачі, визначено поняття компромісу. Розглянуто двокритеріальну задачу з додатковою умовою щодо порядку відвідування вузлів транспортної мережі. Запропоновано новий алгоритм розв'язання отриманої задачі. Проведено чисельні експерименти та порівняно отримані рішення з оптимальними для стандартних однокритеріальних постановок.
**Ключові слова:** задача комівояжера, багатокритеріальність, нечітка задача, компромісне рішення, алгоритм.

**Abstract.** The paper studies a fuzzy multi-criteria traveling salesman problem with criteria in the form of distance and travel time along the route. The problem statement is formalized, the concept of a compromise is defined. Two-criteria problems with an additional condition on the order of visiting nodes of the transport network are considered. A new algorithm for solving the resulting problem is proposed. Numerous experiments and a comparison of the obtained solutions with optimal ones for standard single-criteria statements are conducted.
**Keywords:** traveling salesman problem, multi-criteria, fuzzy task, compromise solution, algorithm.

Розв'язання сучасних проблем логістики передбачає аналіз і оптимізацію логістичних операцій, включаючи планування, координацію та контроль руху та зберігання товарів, послуг і інформації, оптимізацію потоків у мережі [1-2]. Завдяки методам і моделям імітаційного моделювання можна створювати комп'ютерні моделі логістичної системи та використовувати їх для тестування різних сценаріїв та оптимізації продуктивності системи.

Однією з найбільш відомих оптимізаційних задач комбінаторного типу є задача комівояжера, зміст якої полягає у необхідності скласти маршрут руху в рамках заданої сукупності зв'язаних між собою пунктів (міст), що утворюють транспортну мережу конкретного регіону [3]. Комівояжеру необхідно скласти маршрут, за яким він має відвідати усі міста мережі з урахуванням критерію, за яким відстань, яку потрібно подолати, або час подолання були мінімальними. Особливістю задачі є те, що маршрут повинен проходити через усі пункти, причому, кожен з пунктів потрібно відвідати не більше одного разу.

Задача комівояжера - комбінаторна задача, для розв'язання якої можна використовувати методи математичного програмування. Для визначеності можна пронумерувати міста числами $(1,2,3,\ldots,n)$, тоді маршрут комівояжера буде описуватись циклічною перестановкою

номерів $t = (j_1, j_2, ..., j_n, j_1)$, причому усі $j_1, ..., j_n$ - різні номери. Будь-яка перестановка з номерів, яка подана у такому вигляді, представляє можливий розв'язок задачі, а отже, існує $(n-1)!$ можливих шляхів для побудови його маршруту. Проблема комівояжера полягає в тому, щоб вибрати оптимальний з точки зору довжини або тривалості подорожі маршрут, який задовольняє деяким заданим обмеженням.

*Математична постановка задачі*. Сукупність міст мережі можна розглядати у вигляді вершин деякого графу з заданими відстанями (або часом пересування) між усіма парами вершин $r_{ij}$, які утворюють матрицю $R=\{r_{ij}\}$, $i,j=\overline{1,n}$. Вважаємо матрицю симетричною. Тоді формальне завдання полягає у тому, щоб знайти найкоротший маршрут (за часом або довжиною) $t$, який проходить через кожне місто та закінчується в точці відправлення.

Змінними задачі є елементи бінарної матриці переходів між вершинами $X= =\{x_{ij}\}$, $i, j \in I$, $I$ - множина вершин графу. Елементи $x_{ij}$, $i, j \in I$, дорівнюють 1, якщо у побудованому маршруті для задачі присутнє ребро ($v_i, v_j$), 0 – в іншому випадку. Оптимальним є найкоротший за відстанню або за часом маршрут:

$$E = \sum_{i \in I} \sum_{j \in I, j \neq i} r_{ij} x_{ij} \to \min \quad (1)$$

з обмеженнями

$$\sum_{j \in I, j \neq i} x_{ij} = 1, \ i \in I,$$

$$\sum_{i \in I, j \neq i} x_{ij} = 1, \ j \in I, \quad (2)$$

$$v_i - v_j + n x_{ij} \leq n-1, \ 1 \leq i \neq j \leq n.$$

Зрозуміло, що проблема розв'язання задачі (1), (2) з метою знаходження оптимального маршруту представляє собою класичний варіант постановки задачі комівояжера, при вирішенні якої в якості критерію окрім згаданих вище можуть розглядатися вартість перевезень (проїзду), ефективність руху за маршрутом з урахуванням обсягу або ваги вантажних перевезень, тощо. Характерною рисою усіх таких задач є наявність лише одного критерію оптимальності вибору маршруту.

В реальному світі поняття тривалості або вартості подорожі між окремими пунктами транспортної мережі не є фіксованим, вони визначаються наближено, часто з впливом суб'єктивних факторів на оцінки часових термінів або вартості переміщення за ділянками маршруту. Це призводить до необхідності врахування умов руху, їх формалізації на основі різної методики та врахування різних критеріїв оцінки ефективності обраного маршруту.

Серед узагальнених постановок задачі комівояжера варто приділити увагу задачам з декількома критеріями оптимальності. Розглянемо для визначеності задачу комівояжера з двома критеріями, у яких будемо мінімізувати сумарну відстань та час переміщення за маршрутом. Іншими словами, у постановці задачі комівояжера (1), (2) замість єдиного критерію визначимо два інших

$$F_1 = \sum_{i \in I} \sum_{j \in I, j \neq i} d_{ij} x_{ij} \to \min,$$

$$F_2 = \sum_{i \in I} \sum_{j \in I, j \neq i} t_{ij} x_{ij} \to \min, \quad (3)$$

(4)

де величини $d_{ij}$ та $t_{ij}$, $i,j=\overline{1,n}$, є елементами відповідних матриць $D=\{d_{ij}\}$, та $T=\{t_{ij}\}$, $i,j=\overline{1,n}$, які визначають відстані та час переміщення між усіма парами вершин транспортної мережі.

Якщо рухатись на ділянках маршруту з однаковою швидкістю, то час проїзду між довільними містами буде пропорційним відстані між ними. Але такі умови є ідеалізованими. На швидкість руху впливають різні об'єктивні та суб'єктивні фактори (завантаженість транспортного потоку, погодні умови,

тощо), що вимагає одночасного розгляду обох критерії оптимальності.

Таким чином, одним з варіантів двокритеріальної задачі комівояжера є задача пошуку оптимального за довжиною та часом проїзду маршруту на основі критеріїв виду (3), (4) за умови виконання обмежень (2).

Використання двокритеріальної задачі додатково ускладнює розв'язання задачі комівояжера. Виникають питання щодо формулювання у цьому випадку поняття ефективного розв'язку за умови антагоністичності сформульованих критеріїв та застосування методів розв'язування відповідної задачі.

Відомо, що алгоритми, які дозволяють вирішити проблему знаходження оптимального маршруту, розподіляють на точні та евристичні [4]. Точні методи гарантують знаходження оптимального розв'язку задачі за певний час або з урахуванням певних ресурсних обмежень. Як правило, точні методи доцільно використовувати лише до задач невеликого масштабу (наприклад, з метою первинного проектування транспортної мережі малих розмірів), оскільки для їх реалізації необхідні великі обчислювальні потужності.

З іншого боку, евристичні методи - це алгоритми, які не гарантують знаходження оптимального розв'язку, а, натомість, спрямовані на швидкий пошук локально оптимального розв'язку. Традиційно використовуються підходи на основі випадкового пошуку або жадібного алгоритму, щоб швидко дослідити простір розв'язків і знайти у ньому перспективний розв‘язок для вирішення задачі. Такі методи є більш гнучкими і можуть бути застосовані до проблем більшого масштабу, але розв'язок, який вони пропонують, може бути неоптимальним.

Одними з найбільш ефективних методів розв'язання типової задачі комівояжера є методи на основі використання генетичного алгоритму [5], мурашиного алгоритму [6] та алгоритмів реалізації ройового інтелекту (бабок, бджіл, вовків, тощо) [7]. Усі ці методи за своєю сутністю є евристичними, які при якісному налагодженні параметрів дозволяють швидко знаходити локальні оптимальні розв'язки.

Для розв'язання сформульованої двокритеріальної задачі пропонується провести модифікацію критеріальних функцій шляхом їх зведення до одного критерія. В якості способу перетворення критеріїв можна розглянути величини ефективності переміщення кожною ділянкою транспортної мережі, для чого треба звести вихідну задачу до однокритеріального вигляду (1), (2) з матрицею *R*, елементи якої $r_{ij} = t_{ij} / d_{ij}$, $i,j = \overline{1,n}$ . Використання згаданих вище методів розв'язання задачі комівояжера дозволяє отримати компромісний у деякому розумінні маршрут.

Дво- та багатокритеріальні задачі комівояжера можуть виникати й у іншій спосіб. Припустимо, що у традиційній постановці задачі додатково задається умова щодо визначеного порядку проїзду на мережі, наприклад, у вигляді першочерговості відвідування (за маршрутом конкретно визначений вузол *i* має обов'язково передувати іншому заданому вузлу *j*). Така вимога не суттєво ускладнює процес розв'язання задачі, для чого у методах потрібно лише вибраковувати усі розв'язки, в яких не виконується згадана умова.

Нарешті, на особливу увагу заслуговують загальні постановки багатокритеріальних задач комівояжера, в яких окремі критерії оцінюють якість маршруту за різними, а не лише транспортними показниками. В якості таких цільових функцій, що найчастіше розглядаються, слід відзначити критерії оцінювання маршруту за економічністю або безпекою переміщення за етапами, формулювання вимог на визначення та порядок відвідування вузлів і кластерів руху, тощо. Зрозуміло, що побудова компромісних розв'язків у таких випадках не може бути чітко визначеною.

Дійсно, за наявності різних оптимальних маршрутів у задачі комівояжера за окремих критеріїв, які визначаються у вигляді відповідних

послідовностей вузлів мережі, формулювання компромісної послідовності буде вимагати створення правил врахування величин заданих критеріїв та схем модифікації сукупності розв’язків з метою визначення номерів етапів компромісного маршруту. Іншими словами, у цьому випадку потрібно вирішити завдання щодо визначення методики переформатовування (зміни) наявних оптимальних послідовностей з метою узгодження величин критеріїв якості маршруту.

Розглянемо підхід, на базі якого можна провести цілеспрямовані перестановки у послідовностях, що складаються з деякої множини вузлів.

Припустимо, що в багатокритеріальній задачі комівояжера розглядається $l$ критеріїв. Для кожного з них отримано оптимальні маршрути у вигляді послідовностей $p_k$ , $k=\overline{1,l}$ . Вважаємо, що усі маршрути відповідають обмежен-ням задачі: починаються й завершуються в одному вузлі та складаються з номерів вузлів, що не повторюються.

Без обмеження конструктивності можна припустити, що послідовності містять неспівпадаючі між собою підпослідовності (принаймні, одну), які складаються з однієї й тієї ж сукупності вузлів. Такі послідовності описують можливі маршрути переміщень на відповідній множині вузлів. Зрозуміло, що початковий і кінцевий вузли в усіх підпослідовностях мають бути однаковими, але їх номери не повинні між собою співпадати. Остання вимога актуальна лише для повної послідовності вузлів транспортної мережі: у цьому випадку розглядаються підпослідовності без кінцевої вершини, що містять усі номери вузлів мережі, але такі, в яких співпадають передостанні номери. Зауважимо, що за умови неспівпадіння цих номерів знайти компромісний маршрут за допомогою даного підходу неможливо.

Таким чином, будемо вважати, що маємо деяку сукупність номерів вузлів мережі $q=\{q_1,q_2,...,q_s\}$ , з яких утворюються різні послідовності, що є частинами оптимальних маршрутів комівояжера при різних критеріях $p_k$ , $k=\overline{1,l}$ . Правила перестановки з метою погодження величин критеріїв залишаються невизначеними, а повний перебір неможливий навіть при досить невеликих наборах вузлів (наприклад, при $s>20$).

Тоді можна розглядати компроміс у вигляді послідовності, яку буде отримано в результаті використання деякого додаткового алгоритму, який відноситься до класу комбінаторних оптимізаційних методів і за змістом відповідає постановці вихідної задачі. Для задачі комівояжера в якості такого алгоритму може бути використаний алгоритм на основі методу Пріма [8], який дозволяє побудувати мінімальне кістякове дерево (остов) зваженого зв'язного неорієнтованого графу. Це один в відомих жадібних алгоритмів, що розгляда-ється на графі, заданому у вигляді дерева. Починаючи з заданої вершини остов розростається, поки не охопить усі вершини початкового графу. На кожному кроці до поточного стану остовного дерева приєднується найлегше з ребер у заданій в задачі метриці, що з'єднують вершину з побудованого дерева і вершину, що не належить дереву. У якості метрики можна обирати показник маршруту, який є найбільш важливим або отримується в результаті порівняння важливості усіх критеріїв. Ще одним способом формулювання метрики є використання найменш впливового й найчастіше незмінного на мережі показника якості маршруту, наприклад у вигляді його довжини (відстані між вузлами є сталими величинами, які завжди відомі та практично ніколи не змінюються, на відміну від того часу проїзду, економічних характеристик і т.і.).

Потрібно зауважити, що формальне застосування алгоритму Пріма не дозволяє визначити маршрут без повторень. Для використання методу Пріма в якості алгоритму для пошуку компромісу накладемо умову, аналогічну умові задачі

комівояжера. Отже, будемо шукати маршрут на остовному підграфі транспортної мережі, пункти відвідування в якому не повторюються.

Отриманий в результаті роботи запропонованого алгоритму маршрут на множині вузлів $q$ будемо вважати частиною компромісного маршруту в багато-критеріальній задачі комівояжера і називати побудований у такий спосіб розв'язок задачі *алгоритмічно* компромісним, підкреслюючи його залежність від застосованого при обчисленні методу.

Запропонований підхід не завжди дозволяє побудувати шуканий маршрут у підграфі. При побудові остовного дерева часто має місце невелика кратність вузлів, в наслідок чого формування шляхів, що відрізняються від отриманих за окремими критеріями маршрутів, неможливе.

Для такого випадку вихід було знайдено у збільшенні кількості вузлів підграфу, який подається на вхід алгоритму. Послідовність для пошуку компромісу можна розширити хоча б одним вузлом, додавши його спочатку або у кінці з відповідних пар підпо-слідовностей, які співпадають.

Наведемо результати проведених чисельних експериментів. Розглянемо задачу комівояжера на транспортній мережі з заданою тривалістю переміщень (рис.1, час на переміщення між окремими вузлами задано величинами, розміщеними на відповідних ребрах).

Оптимальний розв'язок задачі комівояжера (1), (2) з часовим критерієм тривалості маршруту визначається наступним шляхом

$$1 \to 2 \to 6 \to 10 \to 11 \to 8 \to 5 \to 9 \to 7 \to 4 \to 3 \to 1, \quad (5)$$

яка становить 156 одиниць [9].

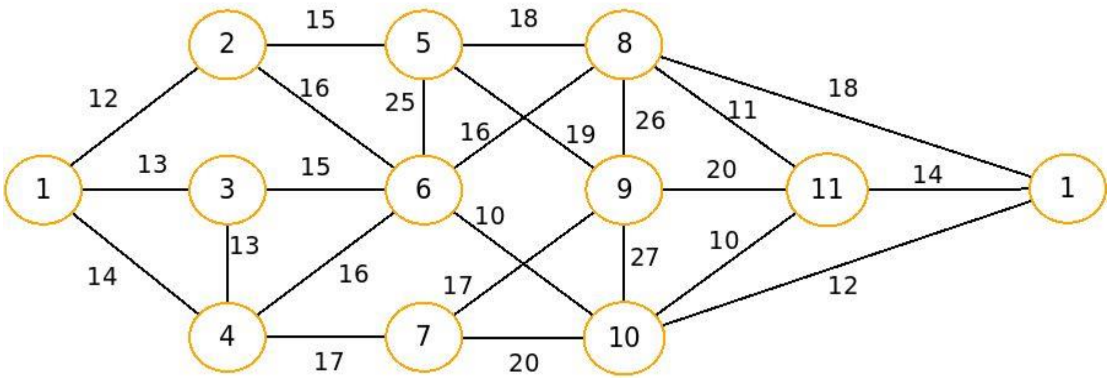



Рис. 1. Приклад транспортної мережі в задачі комівояжера

Припустимо, що задано інший критерій якості маршруту, наприклад, у вигляді умови, що пункт 8 мережі потрібно обов'язково відвідати перед пунктом 11. У цьому випадку, одним з розв'язків є маршрут

$$1 \to 2 \to 6 \to 5 \to 8 \to 11 \to 10 \to 9 \to 7 \to 4 \to 3 \to 1, \quad (6)$$

тривалість якого складає 187 одиниць. Ставиться завдання щодо побудови найкоротшого за тривалістю маршруту комівояжера з урахуванням згаданої вище умови. Результат можна отримати на основі побудови алгоритмічно компромісного маршруту, перша частина котрого буде визначатися пунктами *1, 2, 6*, кінцева – пунктами *9, 7, 4, 3, 1*, які є спільними для обох отриманих результатів, та варіантом відвідування пунктів 6, 5, 8, 10, 11, 9, що можна визначити на основі методу Пріма.

В якості цільової функції для методу можна розглядати найменшу довжину шляху в остовному дереві або запропоновану на початку статті ефективність переміщення $r_{ij} = t_{ij} / d_{ij}$ на мережі з вузлами 5, 6, 8, 9, 10 та 11. Отримана послідовність руху має починатися у пункті 6 та завершуватися у пункті 9. За алгоритмом вона проходить за всіма вершинами, без повторень, що відповідає умові задачі комівояжера.

Для визначеності розглянемо критерій у вигляді довжини маршруту без повторення номерів у послідовності. Нескладно перевірити, що на підграфі з заданих вузлів немає іншого маршруту, крім отриманих у послідовностях (5) та (6). Для пошуку компромісного розв’язку на основі модифікованого алгоритму Пріма потрібно доповнити послідовність, як мінімум, вузлом 2 або вузлом 7.

Формалізація вибору додаткових вузлів пов’язана лише з необхідністю отримання кінцевого результату, який має відрізнятися від оптимально визначених за окремими критеріями варіантів маршруту. Доповнимо перелік вузлів пунктом 7, тобто для пошуку алгоритмічно компромісного розв’язку будемо розглядати вузли 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 транспортної мережі.

Припустимо, що відстані між визначеними вершинами визначаються матрицею

$$V\,(5, 6, 7, 8, 9, 10, 11) =$$

$$\begin{bmatrix} \infty & 243 & \infty & 177 & 183 & \infty & \infty \\ 243 & \infty & \infty & 158 & \infty & 201 & \infty \\ \infty & \infty & \infty & \infty & 183 & 196 & \infty \\ 177 & 158 & \infty & \infty & 256 & \infty & 192 \\ 183 & \infty & 183 & 256 & \infty & 274 & 181 \\ \infty & 201 & 196 & \infty & 274 & \infty & 102 \\ \infty & \infty & \infty & 192 & 181 & 102 & \infty \end{bmatrix},$$

тобто вхідний граф для модифікованого алгоритму Пріма має вигляд (рис. 2).

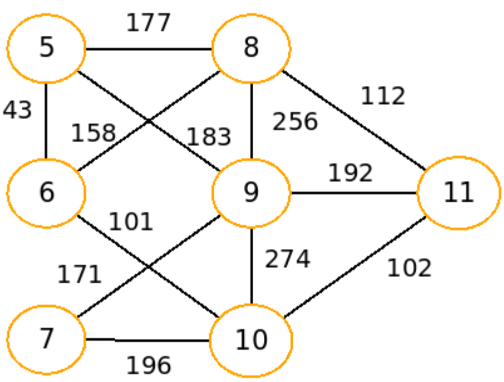



Рис. 2. Граф частини транспортної мережі з відстанями між вершинами

Для даної частини мережі на основі запропонованого варіанта алгоритму Пріма оптимальний маршрут визначається послідовністю

$$6 \to 8 \to 5 \to 9 \to 11 \to 10 \to 7\,, \qquad (7)$$

довжина якого 997 одиниць, а тривалість переміщення за яким складає 103 одиниці часу. Таким чином, отримали компромісний розв’язок вхідної дво-критеріальної задачі комівояжера з умовою пошуку найшвидкісного маршруту на мережі, в якому відвідування вузла 8 обов’язково передує відвідуванню вузла 11. Послідовність переміщення комівояжера має вигляд

$$1 \to 2 \to 6 \to 8 \to 5 \to 9 \to 11 \to 10 \to 7 \to 4 \to 3 \to 1\,, \qquad (8)$$

тривалість руху за якою складає 174 одиниці часу.

Застосування описаного підходу виявилось достатньо ефективним і при

розв’язанні нечітких багатокритеріальних задач комівояжера. У випадку однокритеріальної нечіткої задачі комівояжера оптимальний маршрут обчислюється для заданої цільової функції з нечітко визначеними величинами довжини або тривалості переміщень між пунктами маршруту [10]. За наявності декількох критеріїв ставиться задача пошуку ефективного (компромісного) маршруту комівояжера з урахуванням оптимальних розв’язків, отриманих для кожної цільової функції.

В якості прикладу нечіткої багатокритеріальної задачі комівояжера розглянемо задачу з двома критеріями, які визначаються умовою у вигляді деякого порядку відвідування та цільовою функцією вигляду (4) від нечітко заданої тривалості переміщень у мережі, яка набуває при цьому вигляду

$$F_2 = \sum_{i \in I} \sum_{j \in I, j \neq i} \tilde{t}_{ij} x_{ij} \to \min \quad , \qquad 9)$$

де часові витрати на переміщення між пунктами визначаються елементами матриці $\tilde{T} = \{\tilde{t}_{ij}\}$ , $i, j = \overline{1, n}$ , у вигляді нечітких трапецієподібних чисел (рис. 3).

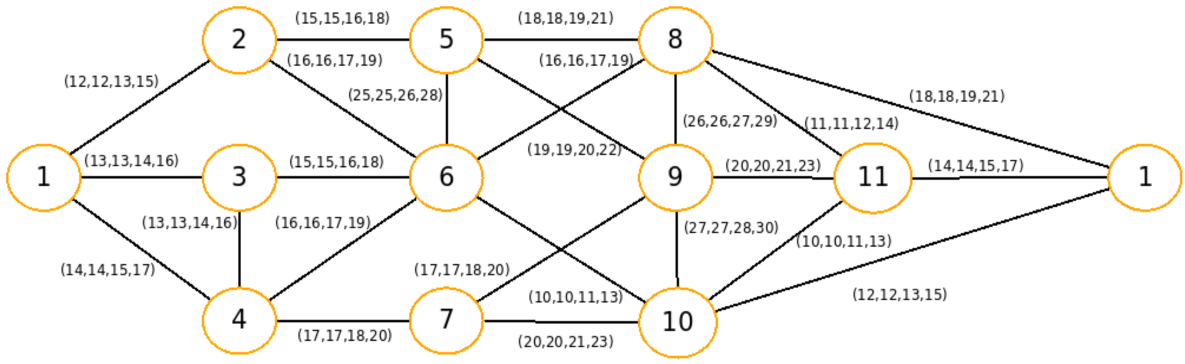



Рис. 3. Схема-приклад задачі комівояжера з нечіткою тривалістю

Для перетворення нечіткої величини тривалості оптимального маршруту до чіткого (числового) значення використаємо метод центру тяжіння (Center of Gravity, *CoG*) або центроїду [11].

За сформульованих умов оптимальний розв’язок задачі комівояжера (9), (2) з нечітким часовим критерієм тривалості маршруту також визначається послідовністю (5), для якої дефазифіковане значення тривалості, отриманої на основі центру тяжіння нечіткої множини, складає 167.9 одиниць часу.

Припустимо, що, як і у випадку чіткої задачі, задано інший критерій якості маршруту у вигляді умови, за якою пункт 8 мережі потрібно обов’язково відвідати перед пунктом 11. Одним з розв’язків є маршрут (6), тривалість якого складає 187 одиниць. Ставиться завдання щодо побудови найкоротшого за тривалістю маршруту комівояжера з урахуванням згаданої вище умови. Повторюючи наведені вище викладки, можна отримати маршрут у вигляді алгоритмічно компромісного розв’язку.

У цьому випадку виокремлена частина послідовності, яка має починатися у пункті 6 та завершуватися у пункті 9, визначається графом, наведеному на рис.4.

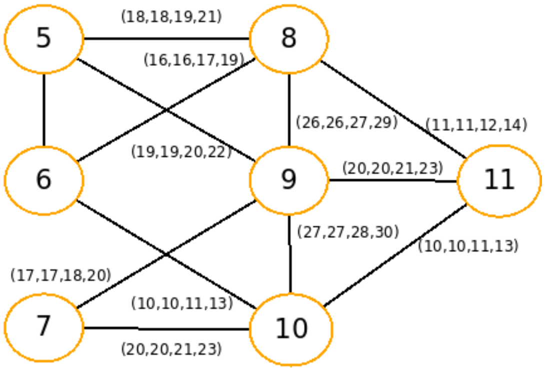



Рис. 4. Граф компромісної частини транспортної мережі

Використовуючи модифікований алгоритм Пріма з заданими у вигляді матриці *V* (5, 6, 7, 8, 9, 10, 11) відстанями між окремими пунктами мережі, отримуємо послідовність вузлів

$$6 \rightarrow 8 \rightarrow 5 \rightarrow 9 \rightarrow 11 \rightarrow 10 \rightarrow 7$$

оптимального маршруту довжиною 997 одиниць і тривалістю переміщення 109,5 часових одиниць, яку обчислено за методом центру тяжіння нечіткої множини.

Остаточно, компромісний розв’язок вхідної двокритеріальної нечіткої задачі комівояжера з умовою пошуку найшвидкісного маршруту на мережі з нечіткими величинами тривалості переміщення, в якому відвідування вузла 8 обов’язково передує відвідуванню вузла 11, визначається послідовністю

$$1 \rightarrow 2 \rightarrow 6 \rightarrow 8 \rightarrow 5 \rightarrow 9 \rightarrow 11 \rightarrow 10 \rightarrow 7 \rightarrow 4 \rightarrow 3 \rightarrow 1,$$

яка співпадає з (8). Тривалість руху за цим маршрутом складає 185,9 одиниць часу.

Потрібно зауважити, що вигляд алгоритмічно компромісного розв'язку залежить від обраного алгоритму для знаходження альтернативи на ділянках неспівпадіння послідовностей та від вигляду цільової функції, що розглядається на відповідній підпослідовності. Але такий підхід повністю відповідає методиці пошуку компромісних рішень у багато-критеріальних неперервних і дискретних задачах оптимізації, в яких остаточний вигляд компромісу на заданій множині альтернатив визначається методом його пошуку.

## Література

1. Martin Christopher. Logistics and Supply Chain Management. - FT Publishing International, 5th edition, 2016. – 328 p.
2. Harrison A., van Hoek R. Logistics Management and Strategy. - Financal Times Management, 2nd edition, 2005. – 308 p.
3. Зайченко Ю.П. Дослідження операцій. - К.: Видавничий дім «Слово», 2006. – 816 с.
4. Golden B., Raghavan S., Wasil E. The Vehicle Routing Problem: Latest Advances and New Challenges. – Springer New York, 2008.
5. Chambers L.D. Practical Handbook of Genetic Algorithms. - CRC Press, 2019. – 592 p.
6. Korte B., Vygen J. Combinatorial Optimization: Theory and Algorithms (Algorithms and Combinatorics). - Springer Berlin, Heidelberg, 2018.
7. Dorigo M., Maniezzo V., Colorni. A. The Ant System: Optimization by a colony of cooperating agents. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part B, 1996. 26(1). P. 29–41.
8. Ajay D. Kshemkalyani, Mukesh Singhal. Distributed Computing: Principles, Algorithms, and Systems. - Cambridge University Press, 2011.
9. Ivohin E. V., Gavrylenko V. V., Ivohina K. E. On the recursive algorithm for solving the traveling salesman problem on the basis of the data flow optimization method // Radio Electronics, Computer Science, Control. - 2023. - № 3. – P. 141-147.
10. Юштін К.Е., Івохін Е.В. Про вплив способів дефазифікації на результати розв’язання нечіткої задачі комівояжера// Штучний інтелект, 2024. - 29 (1). - С. 64-72.

## References

1. Martin Christopher. Logistics and Supply Chain Management. - FT Publishing International, 5th edition, 2016. – 328 p.

2. Harrison A., van Hoek R. Logistics Management and Strategy. - Financal Times Management, 2nd edition, 2005. – 308 p.

3. Zaychenko Yu.P. Operations research. - Kyiv: Publishing house «Slovo», 2006. – 816 p.

4. Golden B., Raghavan S., Wasil E. The Vehicle Routing Problem: Latest Advances and New Challenges. – Springer New York, 2008.

5. Chambers L.D. Practical Handbook of Genetic Algorithms. - CRC Press, 2019. – 592 p.

6. Korte B., Vygen J. Combinatorial Optimization: Theory and Algorithms (Algorithms and Combinatorics). - Springer Berlin, Heidelberg, 2018.

7. Dorigo M., Maniezzo V., Colorni. A. The Ant System: Optimization by a colony of cooperating agents. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part B, 1996. 26(1). P. 29–41.

8. Ajay D. Kshemkalyani, Mukesh Singhal. Distributed Computing: Principles, Algorithms, and Systems. - Cambridge University Press, 2011.

9. Ivohin E. V., Gavrylenko V. V., Ivohina K. E. On the recursive algorithm for solving the traveling salesman problem on the basis of the data flow optimization method // Radio Electronics, Computer Science, Control. - 2023. - № 3. – P. 141-147.

10. Yushtin K.E., Ivohin E.V. About defuzzification methods influence on fuzzy traveling salesman problem's solving// Artificial Intelligence, 2024. - 29 (1). - C. 64-72.

The article has been sent to the editors 12.10.24.
After processing 25.10.24.
Submitted for printing 30.12.24.